

# АНАЛИЗ МЕТОДОВ МАСКИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ БОКОВОГО УХОДА ПОД МАСКУ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ТОЛСТОСЛОЙНОМ АНОДИРОВАНИИ $Al$

Д. Л. Шиманович, В. А. Сокол

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, *ShDL@tut.by*

Особенность использования электрохимического процесса анодирования при создании качественных многоуровневых систем межсоединений заключается в его селективном характере, т.е. образование межэлементного оксида должно происходить не по всей поверхности подложки, а лишь в строго локализованных местах [1-7]. Вопросы, связанные с процессом маскирования, стали одними из определяющих в технологии глубокого локального анодирования. Как известно, применяются два вида маскирования – маскирование фоторезистом и плотными анодными оксидами. При использовании каждого из них возникают свои специфические проблемы из-за повышенной агрессивности электролитов, наличия электрического поля, положительного коэффициента объемного роста при превращении  $Al$  в  $Al_2O_3$  и длительности процесса электрохимического окисления в локализованных местах.

В работе представлена модель поведения границы раздела «плотный  $Al_2O_3$  - пористый  $Al_2O_3$ » в процессе роста пористого оксида в присутствии маски из плотного оксида. Исследованы профили бокового ухода под маску на границе раздела « $Al - Al_2O_3$ » при глубоком локальном анодировании  $Al$  до 150 мкм и проведен их сравнительный анализ в присутствии фоторезистивной маски и маски из плотного анодного оксида. Показано, что маскирование плотным  $Al_2O_3$  является наиболее эффективным и надежным при длительном толстослойном пористом анодировании.

На рис. 1 представлено фото поперечного разреза  $Al - Al_2O_3$  - структуры, полученного с помощью методики поперечного микрошлифа. На исходной  $Al$  подложке толщиной ~500 мкм осуществлялось двухстороннее глубокое пористое анодирование в 5 %  $H_2C_2O_4$  при плотности тока  $j \sim 40$  мА/см<sup>2</sup> в динамическом режиме. С одной стороны подложки пористое анодирование осуществляли локально в зонах, незатененных плотным  $Al_2O_3$ , который формировался в 1 % лимонной кислоте при напряжении  $U \sim 200$  В и служил маской. С обратной стороны пористое анодирование проводили по всей площади образца. Толщина сформированного пористого  $Al_2O_3$  составляла ~150 мкм.

Установлены основные закономерности роста пористого оксида в присутствии маски из плотного оксида (рис. 1). На первой стадии, когда фронт роста пор не достиг границы раздела «плотный  $Al_2O_3 - Al$ », поры растут перпендикулярно поверхности металла (стадии I и II). Когда указанная граница раздела достигнута, то крайние поры, начиная с первой, оказываются в ситуации, при которой боковая стенка первой поры (стадия III) в момент выхода за границу раздела «плотный  $Al_2O_3 - Al$ » (точка A) начинает соприкасаться с металлом. Через боковую стенку, также как и через нижний барьерный слой на дне поры, начинает течь ионный ток. В результате одновременного растворения боковой стенки и ее роста происходит расширение и искривление канала поры в сторону алюминия под плотным оксидом. Искривление канала поры 1 приводит к аналогичному искривлению канала соседней поры 2, затем 3 и т.д. Увеличение площади дна этих пор и искривление канала ведет к усложнению гидродинамического обмена электролитом в реакционной зоне. В этой ситуации поток жидкости уменьшается обратно пропорционально квадрату извилистости, кото-

рая в данном случае равна отношению истинной длины поры к длине поры в случае ее вертикального роста на эту же глубину. Следовательно, извилистость будет максимальна в случае первой поры, удаление электролита со дна поры практически прекращается и ее рост резко замедляется. По мере удаления от первой поры извилистость уменьшается и на достаточном расстоянии становится равной единице, где поры продолжают расти вертикально. В результате искривления каналов крайних пор и замедления и прекращения их роста формируется своеобразный профиль пористого оксида.

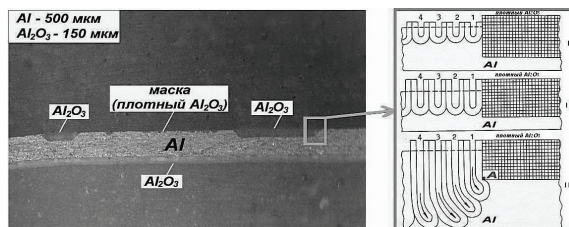


Рис. 1. Микрошлиф  $Al - Al_2O_3$  - структуры при маскировании плотным анодным оксидом и последовательные стадии роста пористого оксида в зоне раздела «плотный  $Al_2O_3$  - пористый  $Al_2O_3$ »

Из фото отчетливо видно, что край пористого оксида при соприкосновении с маской имеет характерный овальный профиль, принципиально отличный от профиля при травлении. Изучение серии аналогичных фотографий, полученных при разной толщине пористого оксида, показало, что боковой уход не превышает 10–12 % от толщины оксида и что это в 8–10 раз меньше, чем боковые уходы при обычном химическом травлении. Этот факт убедительно подтверждает влияние искривления пор на краю оксида и замедление их роста, приводящее к резкому сужению зоны поданодирования. Следует, однако, отметить, что при маскировании оксидами значительные механические напряжения также имеют место. Зафиксированы редкие случаи, когда в плотном маскирующем слое в процессе роста пористого оксида образовывались трещины. Через трещины проникал электролит, и происходило анодирование под маской. В целом же маскирование плотными оксидами является наиболее эффективным и надежным для любых электролитов, используемых для локального пористого анодирования.

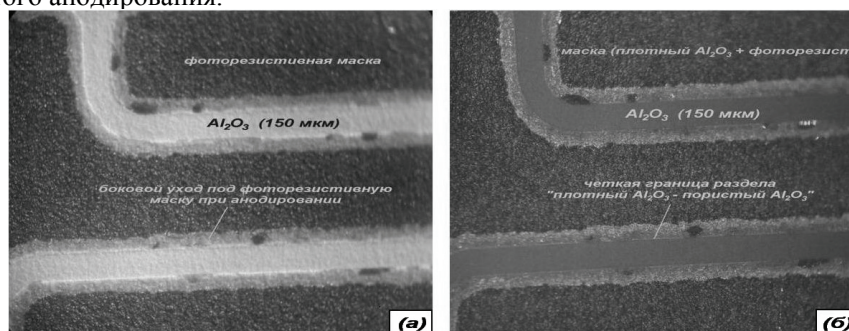


Рис. 2. Сравнительный анализ использования маскирования фоторезистом (а) и плотным  $Al_2O_3$  (б) при глубоком локальном анодировании

Фото, представленные на рис. 2 (а, б), позволяют провести сравнительную оценку бокового ухода границы раздела «оксид – металл» при длительном локальном анодировании с применением маскирования фоторезистом (даже с использованием адгезионного подслоя из тонкого пористого  $Al_2O_3$  под фоторезистивной маской, который формировали в 5 % щавелевокислом электролите при  $U \sim 50$  В в течение 25 с) и с

применением маскирования плотным  $Al_2O_3$ , который формировали в 1 % лимонной кислоте при  $U \sim 220$  В.

Пористое анодирование проводили в 5 % щавелевокислом электролите в комбинированном режиме: гальваностатическом ( $j \sim 40$  мА/см<sup>2</sup>) и последующем потенциостатическом ( $U \sim 150$  В) с формированием пористого  $Al_2O_3$  толщиной 150 мкм. Как видно (рис. 2 (б)), наличие маски из плотного  $Al_2O_3$  позволяет получать четкую границу раздела «пористый  $Al_2O_3$  – плотный  $Al_2O_3$ », а значит и « $Al_2O_3$  – Al» при формировании систем межсоединений без существенного для гибридной технологии ухода от геометрических размеров элементов. Наблюдается лишь нарушение края фоторезистивной маски, расположенной поверх маски из плотного  $Al_2O_3$ , что еще раз подтверждает проблему фоторезистивного маскирования при длительном пористом анодировании Al.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сокол, В. А. Анодные оксиды алюминия. Мн.: Бестпринт. 2011. 431 с.
2. Сокол, В. А. Особенности применения пористых оксидов алюминия. / В. А. Сокол, В. А. Яковцева, Д. Л. Шиманович // Доклады БГУИР. 2012. №2 (64). С. 21.
3. Литвинович, Г. В. Технологические особенности формирования плат со встроенной системой межсоединений в подложках анодного оксида алюминия. / Г. В. Литвинович, Д. Л. Шиманович // Доклады БГУИР. 2013. №3 (73). С. 39.
4. Сокол, В. А. Технологические приемы формирования Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> микроструктур для мощных электромеханических систем. / В. А. Сокол, Д. Л. Шиманович, Г. В. Литвинович // Доклады БГУИР. 2012. №8 (70). С. 44.
5. Сокол, В. А. Исследование профилей на границе раздела Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при глубоком локальном анодировании Al. / В. А. Сокол, Д. Л. Шиманович, В. С. Сякерский // Доклады БГУИР. 2009. №6 (44). С. 36.
6. Шиманович, Д. Л. Встроенная система алюминиевых межсоединений в объеме свободных анодных Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-пластин: сб. материалов XVIII международной научно-технической конференции «Современные средства связи» / Д. Л. Шиманович. 15-16 октября 2013. Минск. 2013. С. 143.
7. Шиманович, Д. Л. Электрохимическая имплантация Al проводников для создания коммутационных оснований на базе анодного Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: сб. материалов VIII международной конференции молодых ученых «Физикохимия-2013» / Д. Л. Шиманович. 11-13 ноября 2013. Москва. 2013. С. 122.

#### ФОРМИРОВАНИЕ БИМЕМБРАННЫХ МАТРИЧНЫХ НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Д. Л. Шиманович, В. А. Сокол, Д. И. Чушкова

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, [ShDL@tut.by](mailto:ShDL@tut.by)

Объект исследований – наноструктурированные бимембраны на основе свободных двухслойных пленок пористого  $Al_2O_3$ , сформированные методом двухстороннего сквозного анодирования и последующей обработкой биполярным анодированием и химическим травлением. Перспективность их использования определяется высокоупорядоченным наноструктурным характером их ячеисто-пористой морфологии, которая может контролироваться электрохимическими и температурными режимами при проведении электрохимического процесса анодирования. Мембраны на основе свободных пленок  $Al_2O_3$ , полученные двухстадийным, но односторонним анодированием Al фольги и химическим удалением остаточного Al, широко освещены в научных изданиях [1-5]. Однако такая методика обладает недостатками, связанными с необходимостью маскирования одной из сторон Al, с необходимостью химического травления непроанодированного Al, получением неплоскостных с признаками ко-